

EFFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

EFFECTOS SOBRE LAS HORTALIZAS POR ACCIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES (FÁRMACOS) PRESENTES EN EL AGUA DE IRRIGACIÓN

EFFECTS ON VEGETABLES BY ACTION OF EMERGING CONTAMINANTS (PHARMACEUTICAL PRODUCTS) PRESENT IN THE IRRIGATION WATER

LEYDI JIMENA VILLANUEVA MOSCOSO

Ingeniera Ambiental, Ing de Proyectos

Estudiante Especialización

Bogotá, Colombia.

u2700964@unimilitar.edu.co

Artículo de Investigación

DIRECTOR

Ph.D. Ximena Lucía Pedraza Nájjar

Doctora en Administración – Universidad de Celaya (México)

Magíster en Calidad y Gestión Integral – Universidad Santo Tomás e Icontec

Especialista en gestión de la producción, la calidad y la tecnología - Universidad Politécnica de Madrid (España)

Especialista en gerencia de procesos, calidad e innovación – Universidad EAN (Bogotá D.C.)

Microbióloga Industrial – Pontificia Universidad Javeriana

Auditor de certificación: sistemas de gestión y de producto

Gestora Especialización en Gerencia de la Calidad - Universidad Militar Nueva Granada

ximena.pedraza@unimilitar.edu.co; gerencia.calidad@unimilitar.edu.co



La U
acreditada
para todos

ESPECIALIZACIÓN EN PLANEACIÓN AMBIENTAL Y MANEJO DE RECURSOS NATURALES

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERÍA

NOVIEMBRE DE 2019

EFFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

EFFECTOS SOBRE LAS HORTALIZAS POR ACCIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES (FÁRMACOS) PRESENTES EN EL AGUA DE IRRIGACIÓN

EFFECTS ON VEGETABLES BY ACTION OF EMERGING CONTAMINANTS (PHARMACEUTICAL PRODUCTS) PRESENT IN THE IRRIGATION WATER

LEYDI JIMENA VILLANUEVA MOSCOSO

Ingeniera Ambiental, Ing de Proyectos

Estudiante Especialización

Bogotá, Colombia.

u2700964@unimilitar.edu.co

RESUMEN

Actualmente existe un gran interés por el estudio de los impactos de contaminantes emergentes (CE), específicamente de productos farmacéuticos, ya que son compuestos químicos de alta producción y uso intensivo, que pueden encontrarse de forma libre en las aguas de irrigación agrícola cuando estas provienen tanto de fuentes hídricas naturales (superficiales y subterráneas) como de sistemas de tratamiento de aguas residuales. Estos compuestos pueden llegar a ser de difícil eliminación y/o degradación, causando problemas ambientales y de riesgo para la salud. El objetivo de esta investigación es analizar los posibles efectos que se pueden generar sobre la fisiología vegetal de las hortalizas por acción de los contaminantes emergentes (fármacos) presentes en el agua de irrigación. Lo anterior a través de revisión de fuentes bibliográficas y un análisis cualitativo y cuantitativo de cada uno de los estudios de tipo experimental consultados. A partir de los análisis realizados, se puede concluir que las modificaciones en la fisiología vegetal de las hortalizas obedecen principalmente a la relación directa que se da entre tres variables fundamentales, como lo son el tiempo de exposición, las concentraciones de fármacos específicos detectadas en el agua de irrigación y la capacidad de absorción. Finalmente, con el trabajo realizado se determina que la mayoría de los casos son contaminantes no regulados en la normatividad ambiental y que se requieren de estudios más detallados para determinar la incidencia de estos contaminantes en la red trófica.

Palabras clave: Contaminantes emergentes, fármacos, aguas residuales, fisiología vegetal.

EFFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

ABSTRACT

There is currently great interest in the study of the impacts of emerging contaminants (EC), with special interest of pharmaceutical products, since those are chemical compounds of high production and intensive use, which can be found freely in agricultural irrigation waters as these came from both from natural water sources (on surface and underground) and from wastewater treatment systems. These compounds can become difficult to eliminate and/or degrade, causing environmental problems and health risks. The objective of the research is to analyze the possible effects that can be generated on the vegetable physiology by the action of emerging contaminants (pharmaceutical products) in the irrigation water. The above through review of bibliographic sources and a qualitative and quantitative analysis of each of the experimental studies consulted. As a result of the analyzes carried out, it can be concluded that the modifications in vegetal physiology of vegetables, are mainly due to the direct relationship between three fundamental variables: exposure time, the concentrations of specific drug detected in the irrigation water and the absorption capacity of the environment. Finally, it is determined that most cases are pollutants which are not regulated in environmental regulations and more detailed studies are required to determine the incidence of these contaminants in the trophic network.

Keywords: Emergent contaminants, pharmaceutical products, residual waters, vegetable physiology.

INTRODUCCIÓN

La producción constante de productos químicos y el uso intensivo de estos está conduciendo a generar mayores impactos negativos sobre el recurso hídrico en todo el planeta debido al uso de diferentes compuestos orgánicos, sales solubles, metales pesados y sustancias químicas con efectos tóxicos, (Robledo Zacarías, 2017). En la actualidad las aguas residuales generadas a partir de las diferentes actividades de origen antrópico (doméstico e industrial) en su mayoría no reciben ningún tipo de tratamiento y solo un bajo porcentaje son sometidas a pretratamientos y tratamientos de tipo aerobio y anaerobio para reducir la carga orgánica presente; sin embargo, estas son vertidas de forma directa sobre las fuentes hídricas, los suelos y otras son empleadas en sistemas de riego agrícola lo que puede llegar a generar una fuerte problemática de contaminación y un alto riesgo para la salud humana y la biota presente en el medio natural.

EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

Las diferentes actividades de cotidianidad de los seres humanos y del sector productivo (industrial, agrícola y pecuario) conducen a la generación de residuos que impactan negativamente el medio natural y, en especial las fuentes hídricas. En los últimos años se han detectado grupos de contaminantes presentes en aguas superficiales, aguas subterráneas, plantas de tratamiento de aguas residuales y fuentes de suministro, estos son los CE, o también conocidos como nuevos contaminantes; un conjunto de compuestos químicos de distinto origen y naturaleza cuya presencia en el ambiente no es necesariamente nueva pero sí la preocupación por las posibles consecuencias de la misma, dado el factor de riesgo que presentan para los seres vivos (Clemente, 2013).

Los CE incluyen una gran variedad de compuestos químicos naturales y sintéticos como productos farmacéuticos, productos para el cuidado personal (PCP), productos químicos, disruptores endocrinos (EDC), esteroides, hormonas, tensoactivos y tensoactivos metabólicos, retardantes de llama, pesticidas, aditivos industriales, nanomateriales y aditivos de gasolina (McKeown, 2015). No solo la naturaleza y persistencia de éstos compuestos químicos, sino también sus productos de transformación, constituye un riesgo potencial tanto para los organismos acuáticos como para la salud humana contemplando los usos posteriores de las fuentes hídricas en actividades de riego y consumo humano, ya que estos compuestos químicos pueden llegar a ser bioacumulables en la red alimentaria, generar modificaciones en la fisiología vegetal y presentar efectos nocivos sobre la salud a largo plazo.

En los ecosistemas acuáticos estaban apareciendo rastros de los principales compuestos farmacéuticos consumidos por los ciudadanos (Correa, 2018). De todos los CE, los que probablemente presentan mayor preocupación y estudio en los últimos años son los fármacos debido a sus propiedades fisicoquímicas (solubilidad en el agua, presión de vapor, detección,

EFFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

reacciones de biodegradación, adsorción, hidrólisis y foto oxidación) determinan su persistencia en el ambiente y facilitan su bioacumulación y a la influencia de los sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales no se encuentran diseñados para eliminar ni degradar de manera eficiente este tipo de contaminantes en concentraciones muy bajas normalmente en microgramo o nanogramo por litro, haciendo que se genere una introducción continua estos en el ambiente.

A nivel mundial y nacional existen experiencias del reúso agrícola que muestran las bondades de esta aplicación y las consideraciones sobre el tipo o nivel de tratamiento aplicado al agua residual antes del reúso (Silva , Patricia , & Madera , 2008), por lo cual en muchos países se genera un interés inminente por las repercusiones que traen consigo la presencia de CE, específicamente los fármacos detectados en fuentes hídricas y su monitoreo continuo. Sin embargo, en Colombia, es poca información la que se tiene sobre este tipo de microcontaminantes. En 2017 dos grupos de investigadores colombianos y españoles se encontraron y, financiados por Colciencias, emprendieron la investigación más exhaustiva que se haya hecho en el país para tratar de encontrar soluciones viables a la contaminación por fármacos en las aguas (Rubiano, 2018).

La regulación de los CE es escasa, debido al desconocimiento de sus efectos, además de que no se tiene un inventario de “todas” las especies químicas presentes en una muestra ambiental, por limitaciones analíticas (Tejada, Quiñonez , & Peña, 2014), por lo tanto se hace necesario incrementar el conocimiento sobre el origen, la transformación y los efectos de este nuevo grupo de contaminantes, y a su vez evaluar los criterios de calidad para los usos del recurso hídrico en actividades agrícolas y reúso de aguas residuales tratadas contemplados en la legislación ambiental, con el propósito de evaluar si existen concentraciones máximas permitidas de CE presentes en los vertimientos de tipo industrial y doméstico, como también en los

EFFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

efluentes de los sistemas de tratamiento que son vertidos directamente sobre cuerpos de agua empleados como fuente de abastecimiento de los sistemas de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se presenta el esquema del proceso llevado a cabo para la obtención y análisis de la información contemplada dentro del estudio de investigación.

Figura 1. Diagrama marco metodológico

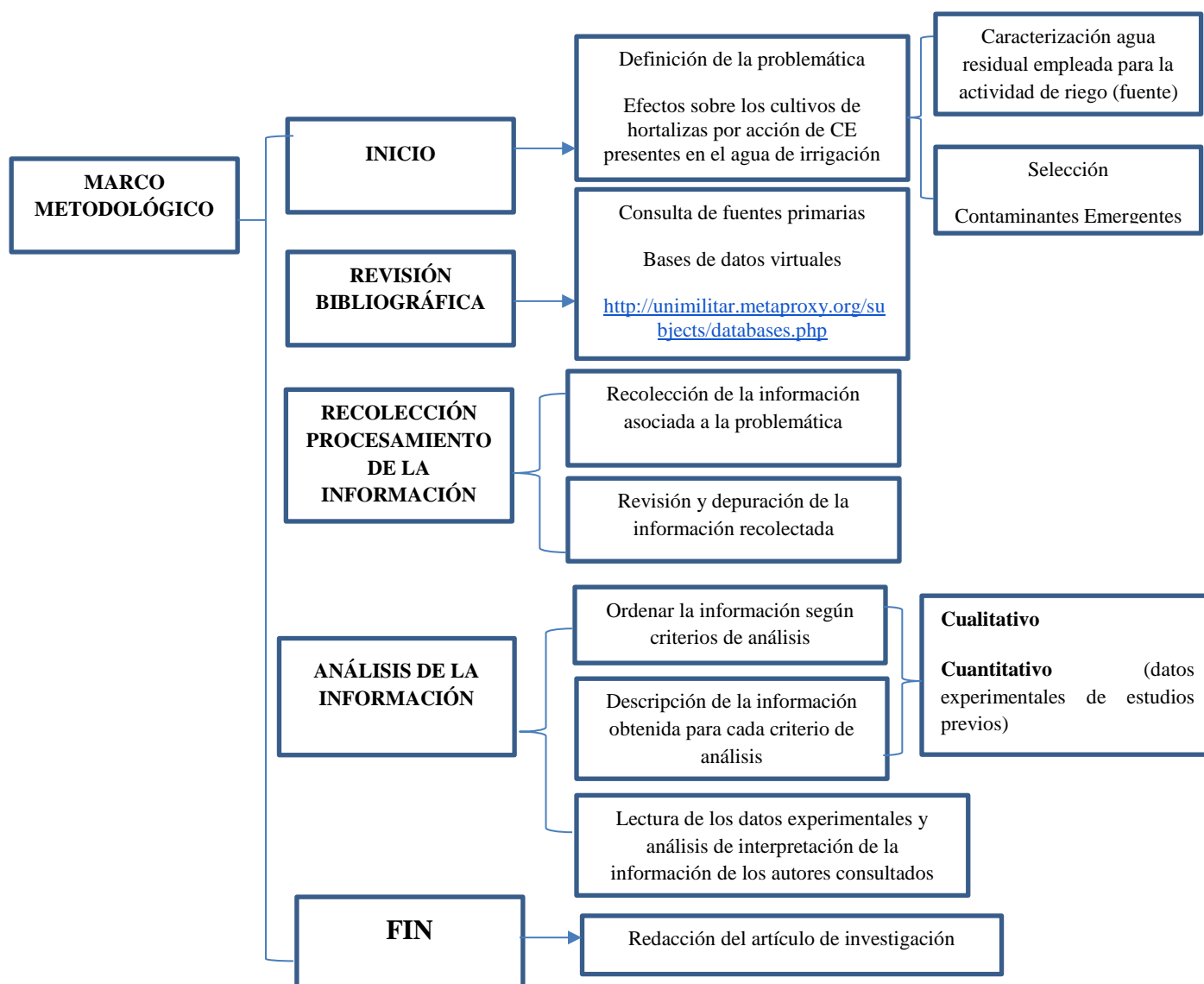


Figura 1. Diagrama secuencial del proceso de investigación. Fuente: Autoría propia, 2019.

EFFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

Marco Referencial

- **Contaminantes emergentes (CE)**

Los CE comprenden un amplio grupo de compuestos químicos de diferente naturaleza como productos farmacéuticos, productos de cuidado personal, agentes tensoactivos, plastificantes y aditivos industriales, estos pueden ingresar en el ambiente a través de algunas fuentes como vertimientos de tipo doméstico e industrial, los efluentes de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, efluentes hospitalarios, actividades agrícolas y ganaderas. Estos compuestos se encuentran dispersos en el medio natural y se han detectado en sistema de abastecimiento, aguas subterráneas e incluso en aguas de consumo.

Son contaminantes de los que se conoce poco, en cuanto a su presencia, impacto sobre el medio natural y tratamiento para su reducción y/o eliminación al interior de los sistemas de tratamiento de aguas residuales; en la mayoría de los casos son contaminantes no regulados, que pueden ser candidatos a regulación futura, dependiendo de investigaciones sobre sus efectos potenciales en la salud y los datos de monitoreo con respecto a su incidencia; por lo tanto, son susceptibles de investigación, (Gil, 2012).

La sociedad en general puede asumir que no hay necesidad de preocuparse por los efectos adversos de los CE ya que sus concentraciones son muy bajas, aunque su toxicidad es crónica y a menudo se traduce de generación en generación, (Mehrdad Taherana, 2018). Además, debido al incremento de la población a nivel mundial, se aumenta la producción de compuestos químicos de diferente naturaleza y a su vez el uso intensivo de estos en la fabricación de diferentes productos que suplen muchas de las necesidades de la población.

En la siguiente tabla se presenta un resumen de los principales efectos sobre los seres vivos de los principales grupos de CE.

EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

Tabla 1.

Efectos sobre los seres vivos de los principales grupos de CE

COEs	Aplicaciones	Efectos sobre la salud
Fármacos y drogas de abuso	Esteroides y anticonceptivos Antibióticos (sulfonamidas, penicilina, tetraciclinas, etc.)	Feminización en machos ^a . Resistencia microbiana. Alteración de la cadena trófica ^a .
Aditivos industriales	Bisfenol-A (fabricación de plásticos)	Actividad estrogénica en ratas y hormonal en seres humanos. Aumento del riesgo de cáncer de mama ^a . Agente anti-andrógeno. Provoca feminización en machos ^a .
	Ftalatos (fabricación de plásticos, juguetes para bebés y suelos)	Alteraciones en el embarazo y abortos involuntarios ^a .
	Alquilfenoles (fabricación de detergentes)	Alteraciones en el desarrollo del proceso reproductivo ^a .
Productos de higiene y cuidado personal	Fragancias con almizcle	Poder cancerígeno en roedores ^a .
	Parabenos (agentes bactericidas y antifúngicos en comidas y cosméticos)	Actividad estrogénica ^a .
	Desinfectantes y antisépticos (fabricación de pastas de dientes, jabón de manos y cremas para el acné; ej. triclosan)	Resistencia microbiana y biocida ^a .
Surfactantes	Compuestos perfluorados (ej. ácido perfluorooctanoico)	Cancerígeno ^b .

Fuente: ^aBolong et al., 2009; ^bFarré et al., 2008

Nota: En la tabla 1 se presentan algunos de los efectos que pueden llegar a generar sobre la salud los CE, adaptado de “Procesos de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de contaminantes orgánicos emergentes”, por Clemente, A. R., Arrieta, E. L. C., & Mesa, G. A. P., 2013.

- **Tipos de CE en el agua – Productos Farmacéuticos**

Los principales productos químicos farmacéuticos que se han detectado en el medio ambiente pueden obedecer a vías de incorporación asociadas a excreciones humanas, la eliminación de productos químicos no utilizados y la eliminación de aguas residuales tratadas porque muchos de estos compuestos no son retenidos en los sistemas de tratamiento. Estos residuos farmacéuticos son incorporados en el medio (agua y suelo) en diferentes concentraciones dependiendo de las propiedades físico-químicas, sus metabolitos, productos de degradación, y las características de calidad de las aguas que los contienen cuando se trata de vertimientos directos.

EFFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

- **Aguas residuales tratadas**

Son aquellas que han sido sometidas a operaciones o procesos unitarios de tratamiento (primario, secundario y terciario) que permiten cumplir con los criterios de calidad requeridos para su reúso en diferentes actividades reguladas.

- **Criterios de calidad**

Hace referencia al conjunto de parámetros fisicoquímicos (compuestos orgánicos, compuestos metálicos, metales pesados y microbiológicos) con sus respectivos valores máximos permisibles que se establecen para los diferentes usos del recurso hídrico.

- **Reúso de aguas residuales para el riego de cultivos agrícolas**

En las áreas que sufren la escasez de agua, o en las épocas de sequía, el uso de aguas no convencionales, tales como los efluentes urbanos tratados, son una opción cada vez más relevante para aumentar la disponibilidad de recursos hídricos y alcanzar un mejor equilibrio entre el suministro y la demanda de agua, (FAO, 2019). El rendimiento de los cultivos puede ser superior, ya que las aguas residuales contienen alta carga de nutrientes que son benéficos para el desarrollo de las hortalizas; sin embargo, existe el riesgo de generar bioacumulación de ciertos compuestos (metales pesados, fármacos y compuestos orgánicos) y de transmisión de enfermedades asociadas parásitos intestinales y microorganismos fecales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características diferenciales de CE (fármacos)

La presencia de microcontaminantes orgánicos persistentes en el ciclo del agua es un tema de gran preocupación debido a la dificultad para su remoción durante los procesos de tratamiento, al aumento considerable de su reúso, al desconocimiento de su presencia o ausencia y a las limitaciones analíticas e instrumentales en el medio (Jiménez Cartagena Claudio, 2011),

EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

este es el caso de los productos farmacéuticos que son incorporados en el agua debido a la presencia de estos en las excretas humanas después de su descomposición (metabolitos), la eliminación de productos no utilizados en los domicilios, vertimiento hospitalarios y el uso de productos químicos administrados a los animales. Estos residuos farmacéuticos son descargados a las fuentes de abastecimiento como resultado del vertimiento directo de las aguas servidas de la población o efluentes de los sistemas de tratamiento.

Es importante puntualizar que a escala mundial los fármacos más usados son analgésicos, antihipertensivos y antibióticos.

- Analgésicos. Productos farmacéuticos de mayor consumo mundial, como el diclofenaco, el naproxeno, el ibuprofeno y el acetaminofén.
- Antihipertensivos. Usados frecuentemente ya que la hipertensión arterial es una enfermedad común, algunos de estos son calcio-antagonista, los inhibidores de la enzima convertidora de angiotensina y los betabloqueadores.
- Antibióticos. Fármacos de amplio uso en el mundo, empleados para combatir microorganismos patógenos en animales y humanos, como Trimetoprima, eritomicina, amoxicilina, lincomicina, sulfamethaxozol, cloranfenicol.

Estos productos farmacéuticos se encuentran en bajas concentraciones usualmente en partes por millón o partes por trillón y en la mayoría de los países no se encuentran regulados. Dentro de las propiedades fisicoquímicas de los fármacos se encuentra la solubilidad en el agua, presión de vapor, detección del efluente, adsorción, hidrólisis y foto oxidación, igualmente estas propiedades determinan su persistencia en el ambiente y bioacumulación. En cuanto a la detección de estos contaminantes en las matrices ambientales (agua, aguas residuales, suelos y sedimentos) es particularmente difícil debido a los bajos límites de detección requeridos, la

EFFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

naturaleza compleja de las muestras y la dificultad para separar estos compuestos de las interferencias (Snow, y otros, 2015).

Sistema de absorción de las plantas y translocación de contaminantes

Después de la producción y uso intensivo de un sin número de productos químicos y sus derivados, estos pueden terminar tanto en el suelo como en el agua, generando un riesgo potencial para la biota del medio natural (nematodos, microorganismos y plantas). En el caso de las plantas que son productores primarios presentan mecanismos muy específicos para adsorber, translocar y acumular ciertos nutrientes esenciales para su desarrollo; sin embargo, algunos compuestos químicos disponibles en los suelos que aunque no son esenciales para los vegetales son absorbidos, translocados y acumulados debido a que pueden presentar propiedades similar a los elementos nutritivos esenciales.

A diferencia de los productos para el cuidado personal, antibióticos y otros productos farmacéuticos tienen una gran afinidad por la absorción de las plantas. La mayoría de los antibióticos tienden a ser absorbido por el transporte apoplástico y acumularse en los espacios intracelulares. Además, causan impactos negativos en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Pullagurala, Rawat, Adisa, Hernandez-Viezcas, & Peralta-Videa, 2018). Es importante destacar que este tipo de microcontaminantes tienden a translocarse en las frutas u hojas dependiendo de si son transportados a través del floema o xilema, que a su vez son canales que facilitan el transporte de nutrientes, agua y sales minerales tomados directamente del suelo por el sistema radicular de la planta.

A continuación se relacionan algunos de los factores que influyen en la absorción de CE por las plantas.

EFFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

- El contenido húmico de los suelos es un factor determinante para la retención de CE
- Componentes del suelo, como las arcillas coloidales que actúan como canales de transporte.
- El pH (ácido y/o alcalino) del suelo que puede influir en la biodisponibilidad
- La lixiviación de los CE en las capas más profundas del suelo
- La movilidad y el envejecimiento en el suelo
- Los iones y los agentes quelantes, debido a la capacidad de intercambio catiónico del suelo
- Los intercambios de follaje aéreo

Efectos de los CE presentes en el agua de irrigación

Para poder analizar los posibles efectos que se pueden presentar sobre la fisiología vegetal de las hortalizas debido a la presencia de CE (fármacos) en el agua de irrigación, es necesario analizar los diferentes hallazgos y estudios de tipo experimental presentado por diferentes autores, con el fin de identificar los elementos que inciden entre el sistema de absorción de las hortalizas y la fijación de ciertos contaminantes.

De acuerdo con lo anterior, se realizó la revisión detallada de los artículos relacionados a continuación donde se exponen dos estudios de tipo experimental:

- *“Occurrence and potential crop uptake of emerging contaminants and related compounds in an agricultural irrigation network”*, (Preciado, Matamoros, & Bayona, 2011).

El objetivo de este estudio fue evaluar la aparición de contaminantes emergentes y compuestos relacionados en las aguas de riego de la red agrícola del Prat de Llobregat (NE España). Dada la gran cantidad de contaminantes que se producen en las aguas de riego y la

EFFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

imposibilidad de evaluar su presencia en la vegetación debido a la falta de técnicas analíticas, en este estudio se estimaron sus concentraciones en cultivos de regadío a partir de las concentraciones de agua mediante el uso de modelos de absorción de compuestos neutros y compuestos iónicos (Preciado, Matamoros, & Bayona, 2011).

Esta investigación es llevada a cabo en la red de riego agrícola de cinco municipios ubicados en la provincia de Barcelona en el noreste de España. El área agrícola abarca aproximadamente 1500 ha y se usa para cultivar vegetales (lechuga, cebolla y pimiento), también se destaca que la actividad de riego es llevada a cabo a través de una serie de canales alimentados con aguas residuales tratadas. Respecto a las campañas de monitoreo estas son realizadas en época de verano cuando predominan los periodos de escasez y por tanto el mayor impacto de los contaminantes se ve reflejado en los cuatro puntos de la red de riego.

De acuerdo con los resultados obtenidos se estima que la concentración de microcontaminantes en las aguas de riego agrícola varió de 10 a 5130 ng L⁻¹, (27 contaminantes detectados). Bromoformo, cloroformo, diclofenaco, cafeína, ibuprofeno, naproxeno, metil dihidrojasmonato, galaxolida, hidroxitolueno butilado e hidroxianisol butilado fueron los contaminantes más abundantes (>200 ng L⁻¹, en promedio). Finalmente, se estimó que la exposición humana a estos contaminantes a través del consumo de frutas y vegetales es de 9,8 µg por persona a la semana, también se identifica que en el proceso de absorción de nutrientes de la planta, los CE entran a ella por medio de la raíz y quedan en las hojas, exponiendo al ser humano a estos contaminantes por medio de su consumo.

La siguiente tabla fue extraída como referencia del artículo de análisis experimental, donde se presentan las propiedades físico-químicas, el BCF (Factor de biotransferencia), las

EFFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

concentraciones del cultivo y la ingesta humana de los microcontaminantes evaluados en los diferentes puntos de monitoreo de la red de riego.

Figura 2. Estimación de las concentraciones de microcontaminantes en cultivos y exposición humana

Table 3
Physico-chemical properties, BCF, crop concentration and human intake of microcontaminants shown in Table 2.

Target analyte	Log K_{ow}	pKa	Log BCF	C_{crop} ($\mu\text{g kg}^{-1}$ dw)	C_{crop} ($\mu\text{g kg}^{-1}$ dw)	Intake ^a (ng person ⁻¹ day ⁻¹)
<i>Disinfection by products</i>						
Chloroform	1.57	–	0.680	0.451	2.160	130
Dichlorobromomethane	1.61	–	0.657	0.036	0.162	10
Dibromochloromethane	1.70	–	0.605	0.099	0.399	24
Bromoform	1.79	–	0.553	0.503	1.799	108
Nitrosodimethylamine, NDMA	–0.57	–	1.917	<0.001	0.011	<1
Nitrosopiperidine, NPIP	0.36	–	1.380	<0.001	0.013	<1
<i>Pharmaceuticals</i>						
Diclofenac	4.02	4.06	–0.802	0.201	0.032	2
Carbamazepine	2.25	–	0.288	0.102	0.102	12
Caffeine	0.16	–	1.496	0.007	0.208	12
Ibuprofen	3.79	4.45	–0.666	0.213	0.046	3
Ketoprofen	3.00	4.25	–1.508	0.156	0.005	<1
Naproxen	3.10	4.38	–1.312	0.262	0.013	<1
Triclosan	4.76	7.9	2.941	0.001	1.245	75
<i>Personal care products</i>						
Methyl dihydrojasmonate	2.98	–	–0.134	1.644	1.206	72
Galaxolide	6.26	–	–2.030	431.8	4.027	242
Tonalide	6.35	–	2.082	307.0	2.540	152
Hidrocinnamic acid	2.29	4.37	–2.009	0.014	<0.001	<1
<i>Phenolic estrogens</i>						
Bisphenol A	3.64	9.7	2.383	0.032	7.677	461
<i>Antioxidants</i>						
BHT	5.03	–	–1.319	37.98	1.821	109
BHA	3.50	–	–0.435	1.709	0.628	38
<i>Flame retardants</i>						
Tributylphosphate	3.82	–	–0.620	1.591	0.382	23
<i>Pesticides</i>						
MCPA	2.52	3.07	–2.920	0.055	<0.001	<1
Mecoprop	2.94	3.78	–1.958	0.044	<0.001	<1

^a Recommendation of 400 g per person a day of fruit and vegetables intake (WHO); dw: dry weight; water content = 85% (human intake = $0.400 \times 0.15 \times C_{crop}$).

El Bromoformo, Cloroformo, Diclofenaco, Caféina, Ibuprofeno y Naproxeno son los fármacos identificados con mayor concentración en el agua con destino agrícola con un valor promedio de > 0,200 $\mu\text{g L}^{-1}$

Figura 2. Propiedades fisicoquímicas, factor de biotransferencia, concentración en cultivos y consumo humano de microcontaminantes, adaptado de “Occurrence and potential crop uptake of emerging contaminants and related compounds in an agricultural irrigation network”, por Calderón-Preciado, D., Matamoros, V., & Bayona, J. M., 2011, *Science of the Total Environment*, p. 18.

De acuerdo con la información presentada en el artículo de estudio y el comportamiento de los diferentes microcontaminantes evaluados se concluye que a pesar de que las concentraciones son bajas, se requieren de más estudios para evaluar el riesgo real que representan para los humanos estos contaminantes a través de la ingesta de alimentos de origen agrícola, que en su momento fueron irrigados con trazas de CE (fármacos).

- “Linking the morphological and metabolomic response of *Lactuca sativa* L exposed to emerging contaminants using GC \times GC-MS and chemometric tools” (Hurtado, 2017).

En este estudio, se realizó un análisis metabólico sobre lechuga (*Lactuca sativa* L) expuesta por la actividad de irrigación a diferentes CE como productos farmacéuticos, productos para el cuidado personal, agentes anticorrosivos y tensoactivos. Las plantas fueron regadas con

EFFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

diferentes concentraciones de CE (0.05 , 0.5 , 5 y $50 \mu\text{g L}^{-1}$), durante 34 días en condiciones controladas y luego cosechadas, extraídas y analizadas por cromatografía de gases bidimensional integral acoplada a un espectrómetro de masas.

La Figura 3 muestra las concentraciones de los diferentes CE en las hojas de lechuga de todas las unidades experimentales después de un período de exposición de 34 días.

Figura 3. Concentraciones detectadas de CE estudiados en hojas

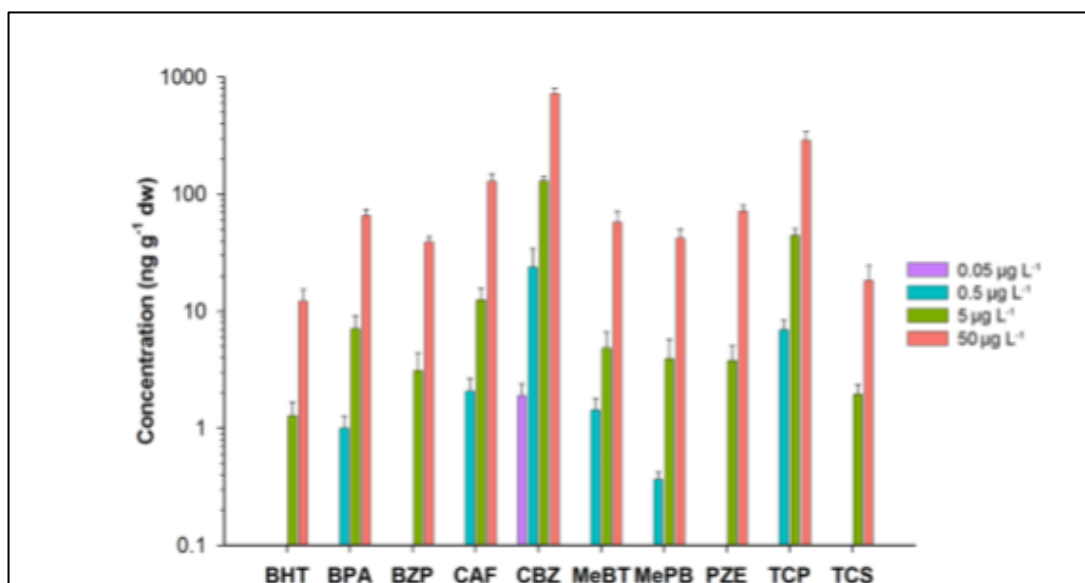


Figura 3. Concentración media y desviación estándar de los CE estudiados para las cuatro concentraciones de riego, adaptado de “Linking the morphological and metabolomic response of lactuca sativa L exposed to emerging contaminants using GC \times GC-MS and chemometric tools” por Hurtado, C., Parastar, H., Matamoros, V., Piña, B., Tauler, R., & Bayona, J. M., 2017, *Scientific Reports*, p. 2.

A partir de los resultados obtenidos en el estudio experimental se destacan los siguientes resultados. No se detectaron concentraciones de CE en la lechuga no expuesta. A la concentración de tratamiento más baja ($0.05 \mu\text{g L}^{-1}$), solo se detectó carbamazepina (CBZ). A concentraciones de riego más altas ($0.5 \mu\text{g L}^{-1}$), también se detectaron bisfenol (BPA), cafeína (CAF), 5-metil-1H-benzotriazol (MeBT), metilparabeno (MePB) y fosfato (TCP). Finalmente, a las dos concentraciones de tratamiento más altas (5 y $50 \mu\text{g L}^{-1}$), se detectaron todas las concentraciones de contaminantes excepto 4-octilfenol (OPL). Las concentraciones de

EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

contaminantes aumentaron durante el curso de los tratamientos en todos los casos.

carbamazepina (CBZ) exhibió la mayor acumulación en hojas, seguido por fosfato (TCP) y cafeína (CAF). hidroxitolueno butilado (BHT) y triclosán (TCS) exhibieron la menor acumulación en hojas.

La respuesta metabólica indica que la exposición a las CEC a concentraciones ambientalmente relevantes ($0.05 \mu\text{g L}^{-1}$) puede causar alteraciones metabólicas significativas en las plantas (metabolismo de carbohidratos, ciclo del ácido cítrico, ruta del fosfato de pentosa y ruta del glutatión) vinculadas a cambios en los parámetros morfológicos (hoja altura, ancho del tallo) y contenido de clorofila. (Hurtado, 2017).

El marco normativo y los criterios de calidad

Las aguas residuales son una importante fuente adicional para satisfacer la demanda del recurso, a causa de la disponibilidad limitada de agua potable para cubrir los requerimientos de las poblaciones, los bajos costos, los beneficios para los suelos agrícolas y la disminución del impacto sobre el ambiente. Sin embargo, el predominio del uso de aguas residuales crudas o diluidas con aguas superficiales y el bajo porcentaje de aguas residuales tratadas en Colombia generan riesgos en la salud pública, en especial cuando se utilizan para riego de cultivos para consumo directo (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2011).

Respecto a la normatividad ambiental específica que se tiene actualmente a nivel nacional para la destinación del recurso hídrico (fuentes superficiales y subterráneas) en actividades agrícolas y el reúso de aguas residuales tratadas; a continuación se relacionan cada una de las normas que fueron consultadas y se describen los aspectos regulatorios referentes a los usos del recurso hídrico (actividades agrícolas y reúso de aguas residuales) y los criterios de calidad aplicables.

EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

Tabla 2.

Normatividad para usos del recurso hídrico en actividades agrícolas

Normatividad	Objeto	Aspectos Regulatorios																						
Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015 (Decreto 3930 de 2010 y Decreto 1594 de 1984)	<p>Capítulo 3 – Ordenamiento del recurso hídrico y vertimientos</p> <p>El presente capítulo establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, ordenamiento del recurso hídrico y vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados</p>	<p>Sección 2 <u>Destinación Genérica de las aguas superficiales y subterráneas</u> Art 2.2.3.3.2.1. Usos del agua (consumo humano, preservación de flora y fauna, agrícola, pecuario, recreativo, industrial, estético, pesca, maricultura y acuicultura, navegación y transporte acuático) Art 2.2.3.3.2.5. Uso agrícola. Se entiende por usos agrícola del agua, su utilización para irrigación de cultivos y otras actividades conexas o complementarias.</p> <p>Sección 3 <u>Criterios de calidad para la destinación del recurso</u> Art 2.2.3.3.3.1. Criterios de calidad. Conjunto de parámetros y sus valores utilizados para la asignación de usos al recurso y como base de decisión para el ordenamiento del recurso hídrico. Art 2.2.3.3.3.2. Competencias para definir los criterios de calidad del recurso hídrico. El Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible definirá los criterios de calidad para el uso de las aguas superficiales, subterráneas y marinas.</p> <p>Sección 9 <u>Disposiciones transitorias</u> Art 2.2.3.3.9.5. Transitorio. Criterios de calidad para uso agrícola.</p> <p>Tabla 3. <i>Criterios de calidad para uso agrícola</i></p> <table><tr><th>Parámetro (mg/L)</th><th>Valor</th></tr><tr><td>Aluminio (mg/L)</td><td>5,0</td></tr><tr><td>Arsénico (mg/L)</td><td>0,1</td></tr><tr><td>Berilio (mg/L)</td><td>0,1</td></tr><tr><td>Cadmio (mg/L)</td><td>0,01</td></tr><tr><td>Cinc (mg/L)</td><td>2,0</td></tr><tr><td>Cobalto(mg/L)</td><td>0,05</td></tr><tr><td>Cobre (mg/L)</td><td>0,2</td></tr><tr><td>Cromo Hexavalente (mg/L)</td><td>0,1</td></tr><tr><td>Flúor (mg/L)</td><td>1,0</td></tr><tr><td>Hierro (mg/L)</td><td>5,0</td></tr></table>	Parámetro (mg/L)	Valor	Aluminio (mg/L)	5,0	Arsénico (mg/L)	0,1	Berilio (mg/L)	0,1	Cadmio (mg/L)	0,01	Cinc (mg/L)	2,0	Cobalto(mg/L)	0,05	Cobre (mg/L)	0,2	Cromo Hexavalente (mg/L)	0,1	Flúor (mg/L)	1,0	Hierro (mg/L)	5,0
Parámetro (mg/L)	Valor																							
Aluminio (mg/L)	5,0																							
Arsénico (mg/L)	0,1																							
Berilio (mg/L)	0,1																							
Cadmio (mg/L)	0,01																							
Cinc (mg/L)	2,0																							
Cobalto(mg/L)	0,05																							
Cobre (mg/L)	0,2																							
Cromo Hexavalente (mg/L)	0,1																							
Flúor (mg/L)	1,0																							
Hierro (mg/L)	5,0																							

EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

Normatividad	Objeto	Aspectos Regulatorios	
		Litio (mg/L)	2,5
		Manganeso (mg/L)	0,2
		Molibdeno (mg/L)	0,01
		Níquel (mg/L)	0,2
		pH (UND)	4,5-9,0
		Plomo (mg/L)	5,0
		Selenio (mg/L)	0,02
		Vanadio (mg/L)	0,1
		Fuente: Decreto 1076 de 2015	
		Parágrafo 1: Además de los criterios establecidos en el presente artículo, se adoptan los siguientes:	
		a. El boro, expresado como B, deberá estar entre 0.3 y 4.0 mg/L dependiendo del tipo de suelo y del cultivo.	
		b. El NMP de coliformes totales no deberá exceder de 5.000 cuando se use el recurso para riego de frutas que se consuman sin quitar la cáscara y para hortalizas de tallo corto.	
		c. El NMP de coliformes fecales no deberá exceder 1.000 cuando se use el recurso para el mismo fin del literal anterior.	

Nota: En la tabla 2 se presentan las disposiciones normativas en cuanto al uso del recurso hídrico en actividades agrícolas, adaptado de “Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015”, por Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Tabla 4.

Normatividad para el uso de aguas residuales tratadas

Normatividad	Objeto	Aspectos Regulatorios
Resolución 1207 de 2014 Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas.	La presente resolución tiene por objeto establecer las disposiciones relacionadas con el uso de las aguas residuales tratadas y no aplica para su empleo como fertilizante o	<p><u>De los usos establecidos para agua residual tratada</u></p> <p>Art 6. Las aguas residuales tratadas se podrán utilizar en los siguientes usos:</p> <p>Uso Agrícola. Para el riego de:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Cultivos de pastos y forrajes para consumo animal -Cultivos no alimenticios para humanos o animales -Cultivos de fibras celulósicas y derivados -Cultivos para la obtención de biocombustibles (biodiesel y alcohol carburante) incluidos lubricantes -Cultivos forestales de madera, fibras y otros no comestibles

EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

	<p> acondicionador de suelos.</p>	<p>-Cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos o animales y que han sido sometidos a procesos físicos o químicos</p> <p>-Áreas verdes en parques y campos deportivos en actividades de ornato y mantenimiento</p> <p>-Jardines en áreas no domiciliarias</p> <p>Parágrafo 2°. En lo que respecta a los cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos o animales, y que han sido sometidos a procesos físicos o químicos, puede usarse el agua residual tratada para riego siempre y cuando se cumplan las normas de la autoridad sanitaria y agrícola en el ámbito de sus competencias.</p>
--	-----------------------------------	--

Nota: En la tabla 4 se presentan las disposiciones normativas en cuanto al reúso de las aguas residuales tratadas, adaptado de “Resolución 1207 de 2014”, por Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Tecnologías eficientes para la eliminación de CE

La mayoría de los CE no tienen regulaciones estándar y podrían provocar efectos letales en la vida humana y acuática, incluso en pequeñas concentraciones las plantas de tratamiento de agua primaria y secundaria convencionales no eliminan ni degradan estos contaminantes tóxicos de manera eficiente y, por lo tanto, necesitan un método de tratamiento terciario (Carmalin & Lima, 2018), tales como la ozonización, la oxidación avanzada, el carbón activado, la nanofiltración y la ósmosis inversa pueden lograr mayores tasas de eliminación de las grandes moléculas de este tipo de contaminantes.

Respecto a la elección del tipo de tratamiento es importante tener en cuenta que los CE presentan una amplia gama de propiedades fisicoquímicas y, por lo tanto, sus porcentajes de remoción varían mucho en función de sus características particulares. Es así como Los procesos para la remoción de CE de las aguas residuales pueden clasificarse en tres categorías: fisicoquímicos, biológicos y avanzados, como se describen en el siguiente diagrama.

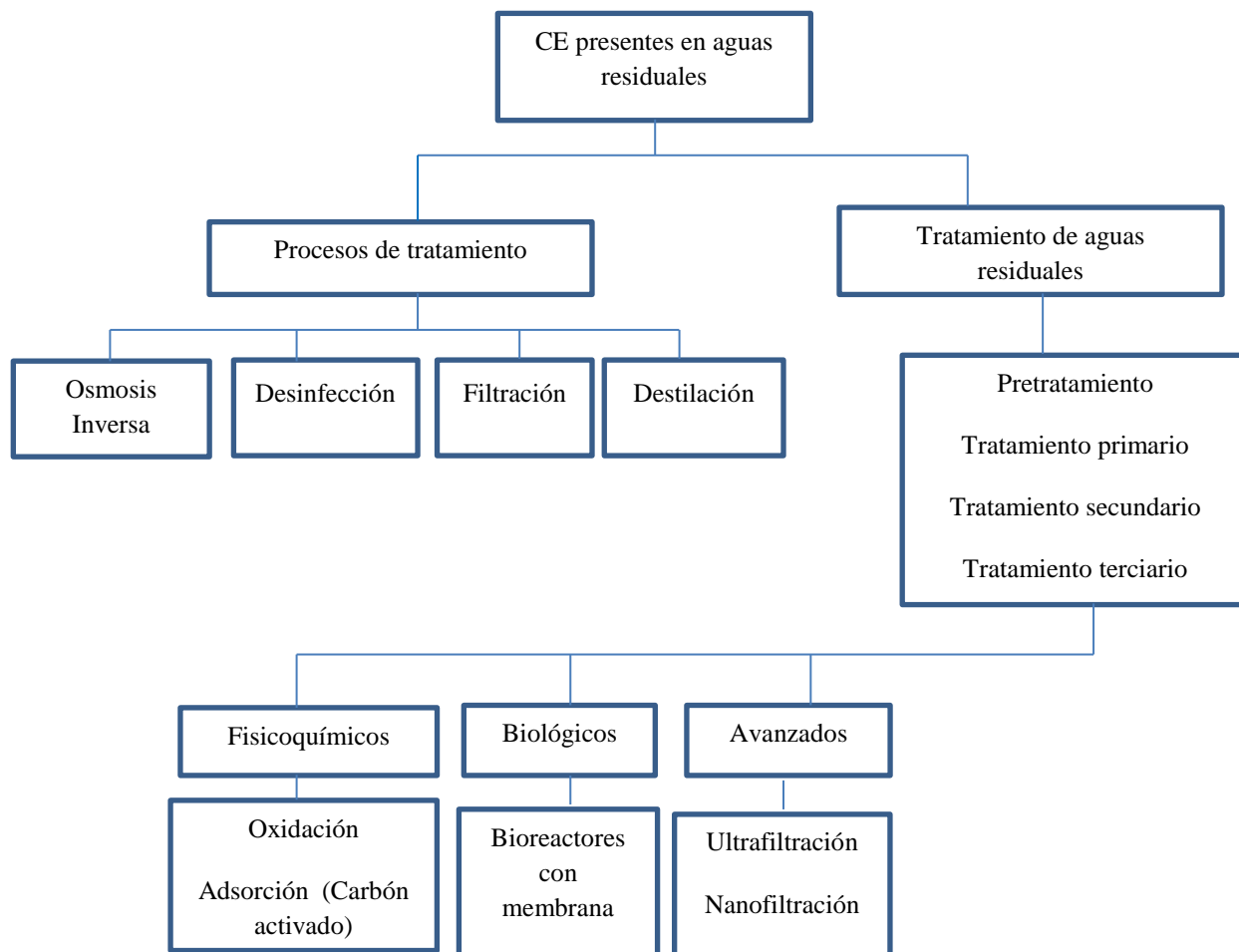
Figura 4. Tratamientos para la eliminación de CE

Figura 4. Procesos de tratamiento primario, secundario y terciario para la eliminación de CE, adaptado de “Removal of emerging contaminants from the environment by adsorption” por Carmalin, S. A., & Lima, E. C. 2018, Ecotoxicology and Environmental Safety, p. 3.

CONCLUSIONES

La liberación de CE al medio ambiente es muy probable que haya ocurrido durante bastante tiempo atrás, pero actualmente son una preocupación, gracias a que por una parte aún se tiene muy poca información acerca de ellos, referente a su tratamiento, su minimización, su efecto en el ambiente y en los seres vivos, igualmente los métodos de análisis para su determinación en concentraciones ambientalmente significativas han estado disponibles

EFFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

recientemente; y por otra parte se tienen los efectos adversos de los fármacos en los humanos que ya son conocidos por sus efectos tóxicos y su actividad disruptiva endocrina.

A pesar de que muchos de los CE se encuentran en bajas concentraciones, esto a lo largo del tiempo podría llegar a ser perjudicial para el crecimiento de las plantas y los consumidores, ya que al presentarse un contenido significativo de CE en el suelo, estos pueden llegar almacenarse en el sistema radicular de la planta para posteriormente ser translocados en frutos y hojas influenciados principalmente por el sistema de adsorción de nutrientes.

Todavía existen vacíos en los conocimientos sobre los efectos de la exposición a largo plazo a los CE – Fármacos, por lo cual se hace necesario desarrollar no solo metodologías instrumentales para su detección y cuantificación, sino, pruebas específicas de ecotoxicidad que permitan obtener aproximaciones reales al riesgo de exposición por parte de los organismos vivos y evaluar el grado de bioacumulación que este tipo de contaminantes pueden llegar a tener en el medio natural.

Según la información regulatoria presentada, es posible establecer que en el país no se tiene normatividad específica en cuanto a criterios de calidad del recurso hídrico ya sea para fuentes hídricas o reúso de aguas residuales tratadas empleadas en actividades de riego de cultivos agrícolas, en lo que concierne a CE (fármacos) lo que puede llegar a convertirse a largo plazo en un riesgo inminente para la salud humana.

En cuanto a la eficiencia de los sistemas de tratamiento empleados para la remoción de los CE, se hace necesario que el tratamiento secundario realizado a las aguas residuales se integre con un esquema de tratamiento avanzado (combinación fisicoquímica o métodos biológicos) para mejorar la calidad de los efluentes y, por lo tanto, eliminar la carga de contaminantes emergentes para su posterior disposición sobre las fuentes hídricas receptoras.

EFFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

Los estudios realizados sobre los contaminantes emergentes en el ambiente se han reportado en escenarios muy generales. Es así como esta revisión, además de mostrar la importancia de este nuevo grupo de contaminantes que están siendo introducidos al medio natural sin ningún tipo de regulación y los posibles riesgos que pueden presentar tanto para la biota de los ecosistemas como para la salud humana, busca generar un llamado de atención con el fin de evaluar los vacíos normativos que existen en el país en cuanto a los criterios de calidad que debe cumplir el recurso hídrico para actividades agrícolas y las aguas de reúso empleadas en actividades de irrigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Calderón-Preciado, D., Matamoros, V., & Bayona, J. M. (2011). Occurrence and potential crop uptake of emerging contaminants and related compounds in an agricultural irrigation network. *Science of the Total Environment*, 412, 14-19. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.09.057
- Carmalin, S. A., & Lima, E. C. (2018). Removal of emerging contaminants from the environment by adsorption. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 150, 1-17. doi:10.1016/j.ecoenv.2017.12.026
- Clemente, A. R., Arrieta, E. L. C., & Mesa, G. A. P. (2013). Procesos de tratamiento de aguas residuales para la eliminación de contaminantes orgánicos emergentes/Processos de tratamento de águas residuárias para a remoção de contaminantes orgânicos emergentes. *Revista Ambiente & Água*, 8(3), 93-103. Recuperado de: <http://ezproxy.umng.edu.co:2048/login?url=https://search-proquest-com.ezproxy.umng.edu.co/docview/1491064892?accountid=30799>
- Correa, P. (20 de Junio de 2018). Los ríos colombianos también están llenos de acetaminofén. *El Espectador*. Recuperado de <https://www.elspectador.com/>
- FAO. (11 de Octubre de 2019). Reutilización de aguas para agricultura en América Latina y el Caribe. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-i7748s.pdf>.

EFFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

- Gil, M. J., Soto, A. M., Usma, J. I., & Gutiérrez, O. D. (2012). Contaminantes emergentes en aguas, efectos y posibles tratamientos. *Producción + Limpia*, 7(2), 52-73. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552012000200005&lng=en&tlng=en
- Hurtado, C., Parastar, H., Matamoros, V., Piña, B., Tauler, R., & Bayona, J. M. (2017). Linking the morphological and metabolomic response of lactuca sativa L exposed to emerging contaminants using GC × GC-MS and chemometric tools. *Scientific Reports*, 7(1), 6546-13. doi:10.1038/s41598-017-06773-0
- Jiménez Cartagena Claudio, P. M. (2011). Pesticidas tradicionales y contaminantes emergentes en la producción hortofrutícola. Bogotá: Corporación Universitaria Lasallista.
- Mehrdad Taherana, M. N. (2018). Emerging contaminants: Here today, there tomorrow! . *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 10 (2018) 122-126. Recuperado de: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/22151532>
- McKeown, A. E., & Bugyi, G. (2015). A review of emerging contaminants in water: Classification, sources, and potential risks. Impact of water pollution on human health and environmental sustainability (pp. 55-80) IGI Global. doi:10.4018/978-1-4666-9559-7.ch003 Recuperado de: <http://services.igi-global.com/resolvedoi/resolve.aspx?doi=10.4018/978-1-4666-9559-7.ch003>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2011). Proyecto desarrollo de capacidades en el uso seguro de aguas residuales para agricultura. Recuperado de www.minagricultura.gov.co
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015. Recuperado de <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>
- Minsiterio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). Resolución 1207 de 2014. Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_1207_2014.pdf

EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EMERGENTES

- Pullagurala, V. L. R., Rawat, S., Adisa, I. O., Hernandez-Viezcas, J. A., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. (2018). Plant uptake and translocation of contaminants of emerging concern in soil. *Science of the Total Environment*, 636, 1585-1596. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.04.375
- Robledo Zacarías, V. H., Velázquez Machuca, M. A., Montañez Soto, J. L., Pimentel Equihua, J. L., Vallejo Cardona, A. A., López Calvillo, M. D., & Venegas González, J. (2017). Hidroquímica y contaminantes emergentes en aguas residuales urbano industriales de morelia, michoacán, México. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, 33(2), 221-235. doi:10.20937/rica.2017.33.02.04
- Rubiano, M. P. (17 de Agosto de 2018). Los enemigos silenciosos de los ríos colombianos. *El Espectador*. Recuperado de <https://www.elspectador.com/>
- Silva, J., Torres, P., & Madera, C. (2008). Reúso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 26(2), 347-359. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-99652008000200020&lng=en&tlng=en
- Snow, D. D., Cassada, D. A., Larsen, M. L., Mware, N. A., Li, X., D'Alessio, M., . . . Sallach, J. B. (2017). Detection, occurrence and fate of emerging contaminants in agricultural environments. *Water Environment Research : A Research Publication of the Water Environment Federation*, 89(10), 897-920. doi:10.2175/106143017X15023776270160
- Tejada, C., Quiñonez, E., & Peña, M. (2014). Contaminantes emergentes en aguas: Metabolitos de fármacos. Una revisión. *Revista Facultad De Ciencias Básicas – Universidad Militar Nueva Granada*, 10(1), 80. doi:10.18359/rfcb.341
- Tran, N. H., Reinhard, M., & Gin, K. Y. (2018). Occurrence and fate of emerging contaminants in municipal wastewater treatment plants from different geographical regions-a review. *Water Research*, 133, 182-207. doi:10.1016/j.watres.2017.12.029